

⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑯ Übersetzung der
europäischen Patentschrift

⑯ Int. Cl. 6:
C 30 B 15/30

⑯ EP 0 247 297 B1

⑯ DE 37 50 382 T 2

E7

⑯ Deutsches Aktenzeichen: 37 50 382.0
 ⑯ Europäisches Aktenzeichen: 87 103 054.0
 ⑯ Europäischer Anmeldetag: 4. 3. 87
 ⑯ Erstveröffentlichung durch das EPA: 2. 12. 87
 ⑯ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: 17. 8. 94
 ⑯ Veröffentlichungstag im Patentblatt: 30. 3. 95

⑯ Unionspriorität: ⑯ ⑯ ⑯

28.04.86 US 856872

⑯ Patentinhaber:

International Business Machines Corp., Armonk,
N.Y., US

⑯ Vertreter:

Barth, C., Dipl.-Ing., Pat.-Ass., 71088 Holzgerlingen

⑯ Benannte Vertragstaaten:

DE, FR, GB, IT

⑯ Erfinder:

Kim, Kyong-Min, Hopewell Junction New York
12533, US; Smetana, Pavel, Poughkeepsie New York
12603, US; Westdorp, Wolfgang Alfred, Hopewell
Junction New York 12533, US

⑯ Züchtung eines Halbleiterkristalls via variabler Schmelze-Rotation.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelebt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

B E S C H R E I B U N G

Züchtung eines Halbleiterkristalls über variable Rotation der Schmelze

Hintergrund der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Kristallzüchtungsverfahren sowie eine Vorrichtung hierfür und insbesondere auf ein Kristallzüchtungsverfahren und eine Vorrichtung für das Züchten von Einkristallen mit einer gleichmäßigen Sauerstoffkonzentration in axialer Richtung im Kristall.

Beim Züchten von Kristallen für die Herstellung von sehr hochintegrierten Schaltkreisbauelementen wurde erkannt, daß es wesentlich ist, daß die Sauerstoffkonzentration in dem unbehandelten Kristall so genau wie möglich gesteuert wird. Diesbezüglich wurde festgestellt, daß der in das Kristallgitter eingebaute Sauerstoff für das Gettern von Fremdatomen aus dem Kristall von Bedeutung ist. Außerdem verleiht das Vorhandensein von Sauerstoff im Kristallgitter dem Kristall eine geforderte Härteeigenschaft. Dementsprechend ist es höchst wünschenswert, einen Halbleiterkristall mit einer über die gesamte Länge des Kristalls hinweg gleichmäßigen Sauerstoffkonzentration zu erzeugen.

Eine Ungleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration in dem Kristallgitter in axialer Richtung ist ein besonderes Problem bei üblichen Kristallzüchtungsverfahren, wie dem Czochralski-Verfahren. Speziell bezugnehmend auf das Czochralski-Verfahren zum Züchten von Halbleiter-Einkristallen wird dort ein Halbleitermaterial mit hoher Reinheit in einem Behälter geschmolzen, und die Temperatur des geschmolzenen Materials wird gerade über dem Schmelzpunkt des Materials gehalten. Ein speziell orientierter Keimkristall wird dann in die Schmelzflüssigkeit eingetaucht und Material lagert sich an dem Kristallkeim durch Oberflächenspannung und Adhäsionskräfte an. Unter den richtigen Bedingungen

wächst mit langsamem Herausziehen des Kristallkeims aus der Schmelze ein Kristall heran.

Mit diesem Verfahren gelangt Sauerstoff auf folgende Weise in die Schmelze. Der Schmelztiegel, in dem die Schmelze enthalten ist, besteht typischerweise entweder aus Silicium(IV)-oxid oder mit Silicium(IV)-oxid beschichtetem Graphit. Bei der Schmelztemperatur von Silicium (etwa 1400 °C) löst sich die Oberfläche des Silicium(IV)-oxid-Schmelztiegels, die mit der Schmelze in Kontakt steht, auf und bildet Siliciummonoxid, SiO . Dieses Siliciummonoxid gelangt in die Schmelze und bildet im wesentlichen die Sauerstoffquelle in der Schmelze und in dem gezogenen Kristall.

Es wurde festgestellt, daß die von diesem Siliciummonoxid herührende Sauerstoffkonzentration in dem Kristall nicht konstant ist, sondern sich vom Kristallkeimende des Kristalls, wo sie das höchste Niveau aufweist, bis zum hinteren Ende des Kristalls, wo sie das niedrigste Niveau aufweist, ändert. Anfänglich liegt der Sauerstoffgehalt der Schmelze in der Größenordnung von 2×10^{18} Atomen pro Kubikzentimeter (ungefähr der Sättigungspunkt). Der Sauerstoffgehalt in dem gezüchteten Kristall, der aus dieser Schmelze gezogen wurde, erstreckt sich von ungefähr $1,5 \times 10^{18}$ Atome/cm³ am Kristallkeimende des Kristalls bis herunter auf ungefähr 6×10^{17} Atome/cm³ am hinteren Ende des Kristalls. Es ist somit ersichtlich, daß sich der Sauerstoffgehalt der Schmelze während des Kristallzüchtungsprozesses verringert. Es wird vermutet, daß diese Sauerstoffverarmung in der Schmelze in einer mit fortschreitendem Wachstumsprozeß und abnehmendem Pegel der Schmelze im Schmelztiegel niedrigeren Auflösungsrate des Schmelztiegels begründet liegt.

Die oben beschriebene Ungleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration in axialer Richtung in dem Halbleiterkristall bedeutet, daß aufgrund des außerhalb der Spezifikation liegenden Sauerstoffniveaus ein wesentlicher Teil des Kristalls verloren ist oder verworfen wird. Zudem bedingt diese Ungleichmäßigkeit in axialer Richtung, daß jegliche Wafer, die an einer gegebenen axialen

Position vom Einkristallkörper abgeschnitten werden, analysiert und nach ihrem speziellen Sauerstoffgehalt sortiert werden. Dieses Prüfen und Sortieren der Wafer nach dem Sauerstoffgehalt ist sowohl kosten- als auch zeitaufwendig und somit in einer Produktionsumgebung höchst unerwünscht.

Es gab eine Anzahl verschiedener Methoden zur Steuerung des Sauerstoffgehalts in Halbleiterkristallen, um dadurch diese Prüf- und Sortierschritte zu vermeiden. In Referenz 1 offenbaren Hoshikawa et al., Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 19, Nr. 1, Januar 1980, Seiten L33 bis L36, ein Siliciumzüchtungsverfahren zur Erzielung axialer Gleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration im Kristall durch Rotieren des Kristallkeimes, des Schmelztiegels und der Schmelze. Die Schmelze wird mittels eines rotierenden Magnetfeldes in Rotation versetzt, das über das Anlegen eines Dreiphasenstromes an einen Dreiphasen-Graphitheizer angelegt wird. Die Referenz beschreibt die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Rotationsrichtungen für den Kristallkeim, den Schmelztiegel und die Schmelze. In einem speziellen Experiment wurden der Kristallkeim, der Schmelztiegel und die Schmelze sämtlich in der gleichen Richtung in Rotation versetzt, die Rotationsgeschwindigkeit des Kristallkeims wurde jedoch während des Wachstumsprozesses des Kristallrohlings von oben nach unten linear von 20 min^{-1} auf 10 min^{-1} verringert. Der Kristall, der aus dieser Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit des Kristallkeims resultierte, wies jedoch für Halbleiterfertigungs-zwecke keine ausreichend gleichmäßige Sauerstoffkonzentration in axialer Richtung auf. Außerdem verursachte die Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit des Kristallkeims einen gleichzeitigen Verlust an Gleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration in radialer Richtung im Kristall.

Referenz 2, Kim et al., IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 25, Nr. 5, Oktober 1982, Seite 2277, bezieht sich ebenfalls auf eine Steuerung der Sauerstoffkonzentration im Kristall und offenbart speziell ein Kristallzüchtungsverfahren, bei dem die Rotation der Schmelze mittels periodischer Aufeinanderfolge von

zwei von drei Phasen eines Signals, das an einen Dreiphasen-Wechselstrom-Heizer angelegt wird, zuerst beschleunigt und dann verzögert wird. Diese periodische Beschleunigung und Verzögerung der Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze hat jedoch zum Zweck, eine gleichmäßige Vermischung der Schmelze in radialer Richtung zu erzielen, und bezieht sich nicht auf die Sauerstoffkonzentration in axialer Richtung in dem Kristall.

Gemäß Referenz 3, IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 23, Nr. 7A, Seiten 2756 bis 2757, 1980, wird die Sauerstoffkonzentration von Siliciumkristallen, die aus einer Schmelze gezogen werden, durch Verwendung einer Rotation der Schmelze gesteuert, die durch das magnetische Feld der Dreiphasen-Widerstandsheizer induziert wird, die zur Erwärmung der Schmelze verwendet werden. Durch Wahl der Geschwindigkeit und Richtung der Rotation des Schmelztiegels relativ zur Richtung der induzierten Rotation und zur Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze wird die Sauerstoffkonzentration in dem resultierenden Kristall auf optimalen Niveaus gesteuert. Sie kann außerdem von Zeit zu Zeit verändert werden.

In Referenz 4, EP-A-0 042 901, ist ein Verfahren zur Steuerung des Sauerstoffkonzentrationsprofils eines Stabes aus kristallinem Material, wie Silicium, der aus einer Schmelze in einem Schmelztiegel gezogen wird, offenbart, das ein Verändern der Rotationsgeschwindigkeit des Schmelztiegels während des Ziehprozesses beinhaltet. In einer bevorzugten Ausführungsform wird das durchschnittliche Sauerstoffkonzentrationsprofil eines Stabes, der bei einer konstanten Geschwindigkeit des Schmelztiegels gezogen wird, gemessen, und dann wird diese Information beim Züchten eines anderen Stabes durch Steuerung der Rotationsgeschwindigkeit des Schmelztiegels während des Ziehprozesses verwendet, so daß dessen Gradient dem Gradienten des gemessenen durchschnittlichen Sauerstoffkonzentrationsprofils entgegengesetzt ist.

In Referenz 5, Patent Abstract of Japan, Vol. 5, Nr. 160 (C-75)

(832) & JP-A-5 692 192 wird angegeben, die Verringerung der Einlagerung von Sauerstoff in einen Kristall sowie das Ziehen und Züchten eines Halbleiter-Einkristalls von hoher Qualität dadurch zu erreichen, daß der Kristall und der Schmelztiegel aus Quarz in derjenigen Richtung in Rotation versetzt werden, die gleich der Richtung der Eigenrotation der Schmelze eines geschmolzenen Rohmaterials durch Verwenden einer Dreiphasen-Wechselstromquelle ist.

Die Erfindung in der beanspruchten Form ist dazu vorgesehen, die oben beschriebene Ungleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration über die Länge des Kristalls hinweg zu beheben.

Die durch die vorliegende Erfindung erreichten Vorteile bestehen darin, daß in axialer Richtung über die Länge des Kristalls hinweg eine Gleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration erzielt wird. Desgleichen wird die Sauerstoffsegregation/-durchmischung in dem Kristall gesteuert. Diese resultierende Gleichmäßigkeit der Sauerstoffkonzentration über die Länge des Kristalls hinweg erlaubt die Eliminierung der zuvor erforderlichen Schritte zum Prüfen der Sauerstoffkonzentration und zum Sortieren. Des weiteren wird eine beträchtliche Steigerung der Kristallzüchtungsausbeute erzielt.

Zusammenfassung der Erfindung

Kurz gesagt zielt die vorliegende Erfindung auf eine Vorrichtung zum Züchten eines Kristalls durch das Czochralski-Verfahren ab, wobei die Vorrichtung einen Schmelztiegel (10) zur Aufnahme einer Schmelze (12), aus welcher der Halbleiterkristall zu züchten ist, Heizmittel (16), um das Material zu schmelzen und das Material in einem geschmolzenen Zustand zu halten, einen Kristallkeimhalter, um einen einkristallinen Kristallkeim (20) zu halten, sowie Mittel, die zum Eintauchen des Kristallkeims in die Schmelze und zum Herausziehen des Kristallkeims aus der Schmelze, um dadurch einen Kristall (22) mit zunehmender Länge daraus zu züchten, betreibbar sind, Rotationsmittel, die so ausgelegt

sind, daß sie lediglich die Schmelze mit einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit in Rotation versetzen, wobei sie Mittel zum Erzeugen eines rotierenden transversalen Magnetfeldes in dem geschmolzenen, leitfähigen Material beinhalten, um dadurch das Material in Rotation zu versetzen, sowie Mittel zur Steuerung der Rotationsmittel beinhaltet, um die Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze zu variieren, wobei die Vorrichtung dadurch gekennzeichnet ist, daß

die Mittel zum Erzeugen des Magnetfeldes Mittel (50, Fig. 2) zum Erzeugen eines n-Phasen-Wechselstromes, wobei n wenigstens drei ist, mit einer Frequenz F von etwa 40 Hz von der Einschnürung des Kristallkeims (das Ende des Kristallkeims, das dem Kristallkeimhalter entgegengesetzt ist und ganz am Anfang des Wachstumsprozesses mit der Schmelze in Kontakt steht) bis zur Kristallschulter, die sich etwa 7,5 cm von der Einschnürung entfernt befindet, und dann mit einer Frequenz, die durch $F = 40 + 4(L - 7,5)$ gegeben ist, wobei L ($L > 7,5$) die von der Einschnürung aus gemessene Länge des gezüchteten Kristalls ist, beinhalten, so daß die Schmelze mit einer Rotationsgeschwindigkeit in Rotation versetzt wird, die kontinuierlich als lineare Funktion der Länge des gezüchteten Kristalls anwächst, und

daß die Heizmittel (16) eine n-phasige, den Schmelztiegel umgebende, magnetische Struktur beinhalten, die so verschaltet ist, daß sie den Strom von den Mitteln zur Erzeugung des n-Phasen-Stromes empfangen, um das transversale Magnetfeld in der Schmelze zu erzeugen.

In einer bevorzugten Ausführungsform beinhalten die Mittel zum Erzeugen des n-Phasen-Wechselstromes Mittel zum Erzeugen eines n-phasigen Signals, dessen Frequenz über den Bereich von 30 Hz bis 200 Hz variiert.

In der oben beschriebenen Ausführungsform können zudem entweder der Kristallkeim oder der Schmelztiegel oder beide in Verbindung mit der Schmelze in Rotation versetzt werden. In einer bevorzug-

ten Ausführungsform wird der Kristallkeim in einer Richtung in Rotation versetzt, die entgegengesetzt zu jener der Schmelze ist, während der Schmelztiegel in der gleichen Richtung in Rotation versetzt wird wie die Schmelze.

In einer bevorzugten Ausführungsform beinhaltet die n-phasige, magnetische Struktur eine Struktur zum Erwärmen der Schmelze mittels einer n-Phasen-Stromversorgung mit der Möglichkeit einer variablen Frequenzeinstellung. Die Mittel zum Erzeugen des n-Phasen-Wechselstromes beinhalten eine Gleichstromquelle zur Gleichstromerzeugung, Mittel zur Steuerung der durch die Gleichstromquelle erzeugten Gleichstromleistung in Abhängigkeit von der Temperatur der Schmelze, sowie Mittel zum Erzeugen des n-Phasen-Wechselstromes aus dem leistungsgesteuerten Gleichstrom.

Die vorliegende Erfindung ist auch auf ein Verfahren zum Züchten von Halbleiterkristallen durch die Czochralski-Technik gerichtet, bei dem ein Halbleiterkeimkristall (20) in einen Schmelztiegel, der ein geschmolzenes, leitfähiges und zum Züchten eines Halbleiterkristalls geeignetes Material (12) enthält, eingetaucht und langsam herausgezogen wird, um einen Halbleiterkristall (22) mit einer mit dem Herausziehen des Keimkristalls immer weiter zunehmenden Länge zu züchten, dadurch gekennzeichnet, daß es die folgenden Schritte beinhaltet:

Anlegen eines rotierenden, transversalen Magnetfeldes an die Schmelze, um deren Rotation zu bewirken, während des Ziehens des Kristalls;

Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit des Magnetfeldes während des Züchtens des Kristalls als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls, um dadurch kontinuierlich die Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze zu erhöhen,

wobei der Schritt zum Anlegen des Magnetfeldes die folgenden Schritte beinhaltet:

Erzeugen eines n-Phasen-Wechselstromes mit einer Frequenz, die als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls variiert, wobei n wenigstens drei ist; und

Anlegen des n-phasigen Stromes an eine den Schmelztiegel umgebende, n-phasige, magnetische Struktur, um das transversale Magnetfeld in der Schmelze zu erzeugen; und

Beenden des Züchtungsvorgangs, wenn die gewünschte endgültige Kristalllänge erreicht ist.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

Fig. 1A und Fig. 1B beinhalten schematische Schnittansichten einer üblichen Czochralski-Vorrichtung zum Züchten eines Siliciumkristalls mit einem Dreiphasen-Wechselstrom-Heizer.

Fig. 2 ist ein schematisches Schaltbild des Schaltungsaufbaus zur Steuerung von Frequenz und Leistung, der zur Implementierung einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung verwendet werden kann.

Fig. 3 ist eine graphische Darstellung der Sauerstoffkonzentration (ppma) in Abhängigkeit von der Kristalllänge (cm).

Fig. 4 ist eine graphische Darstellung der Frequenz (Hz) in Abhängigkeit von der Kristalllänge (cm).

Detaillierte Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform

Die vorliegende Erfindung besteht in einer Verbesserung des Verfahrens und der Vorrichtung, die beim Züchten von Einkristallen aus Halbleitermaterial mittels des bekannten Czochralski-Verfahrens verwendet werden. Beim Czochralski-Verfahren wird eine Charge aus sehr reinem Silicium, aus dem der Einkristall gezogen werden soll, in einen Schmelztiegel gebracht. Die Oberfläche des Schmelztiegels, die mit der Halbleiterschmelze in Kontakt steht,

besteht aus hochreinem Silicium(IV)-oxid. Wenn ein dotierendes Fremdatom zu dem Kristall hinzugefügt werden soll, wird es der Charge aus Silicium beigemischt. Der Schmelzriegel, der die Charge enthält, wird in einer kontrollierten inerten Atmosphäre, wie Argon, angeordnet. Dreiphasige Kohlenstoff-Widerstandsheizer umgeben den Schmelzriegel, erzeugen Wärme und bewirken, daß die Temperatur der Charge gerade über dem Schmelzpunkt des Halbleitermaterials konstant gehalten wird. Ein Keimkristall, der aus einem kleinen, hochgradig perfekten Kristall aus Halbleitermaterial besteht, wird am Ende eines Ziehstabes befestigt. Ein Beispiel für einen typischen Keimkristall ist ein quadratischer Stab aus Silicium mit einem Durchmesser von etwa 0,64 cm und einer Länge von etwa 7,68 cm. Der Ziehstab wird über einen herkömmlichen Kristallziehmechanismus betätigt, der dessen Aufwärtsbewegung mit einer ausgewählten gleichförmigen Geschwindigkeit steuert, wie von etwa 0,64 cm pro Stunde bis 10,24 cm pro Stunde. Der Keimkristall wird in den geschmolzenen Halbleiter abgesenkt, und er darf teilweise schmelzen, um jegliche Oberflächenunvollkommenheiten zu entfernen. Dann wird der Keimkristall langsam aus der Schmelze herausgezogen und während seines Herausziehens mit einer Geschwindigkeit von zum Beispiel 5 min⁻¹ bis 25 min⁻¹ gedreht, so daß ein zylindrischer Kristall erzeugt wird. Die Ziehgeschwindigkeit und Erwärmung der Siliciumcharge wird anfangs höher gewählt, um alle Versetzungen, die entstehen, wenn der Kristallkeim zum erstenmal in das geschmolzene Halbleitermaterial eingebracht wird, zu minimieren oder zu eliminieren. Wenn dieser sogenannte Einschnürungsbereich in dem Kristall gebildet ist, werden die Ziehgeschwindigkeit und die Leistung für die Heizspulen verringert, bis der erwünschte Kristalldurchmesser von etwa 2,56 cm bis 12,8 cm erreicht ist. Dieser Durchmesser wird dann bis annähernd zum Ende des Kristallziehvorgangs beibehalten. Typischerweise wird ein 30 cm langer Kristall erzeugt. Dieser Kristall wird dann in dünne Scheiben geschnitten, die üblicherweise als Wafer bezeichnet werden, die nach Dünnermachen und Polieren einer herkömmlichen Serie von Epitaxie-, Maskierungs-, Diffusions- und Metallisierungsschritten unterzogen werden, wie sie zur Herstellung von mikroelektronischen Komponenten

erforderlich sind. Das oben beschriebene Verfahren stellt eine kurze Beschreibung des üblichen Czochralski-Verfahrens zur Kristallzüchtung dar.

Wie vorher erwähnt, enthalten Kristalle, die unter Verwendung des oben beschriebenen Verfahrens gezüchtet wurden, Sauerstoff in Mengen von etwa $1,5 \times 10^{17}$ Atome/cm³ am Kristallkeimende des Kristalls bis etwa 6×10^{17} Atome/cm³ am hinteren Ende des Kristalls. Dieser Sauerstoffgehalt resultiert aus dem Kontakt des heißen Materials der Schmelze mit der Oberfläche des Schmelztiegels aus Silicium(IV)-oxid, durch den sich Siliciummonoxid bildet, wodurch Sauerstoff in das Material der Schmelze gelangt. Es wird angenommen, daß sich der Sauerstoffgehalt in der Schmelze anfänglich etwa in Sättigung befindet oder etwa 2×10^{18} Atome/cm³ an Sauerstoff beträgt. Die Sauerstoffkonzentration nimmt während des Kristallziehvorgangs aufgrund einer niedrigeren Auflösungsrate der Schmelztiegeloberfläche ab. Diese niedrigere effektive Auflösungsrate wird der relativen Abnahme der Fläche des Schmelztiegels, die mit der Siliciumschmelze in Kontakt steht, und außerdem einer relativen Abnahme der Vermischung in der Schmelze zugeschrieben.

Die vorliegende Erfindung modifiziert das oben beschriebene Czochralski-Verfahren durch Rotieren der Schmelze mit einer Rotationsgeschwindigkeit, die sich als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls ändert. Diese Modifikation des Czochralski-Verfahrens resultiert in einem gleichmäßigen Sauerstoffgehalt in axialer Richtung in dem gezüchteten Kristall.

Nun bezugnehmend auf Fig. 1 ist dort eine Schnittansicht einer üblichen Czochralski-Kristallzüchtungsvorrichtung von oben und von der Seite gezeigt. Die Vorrichtung beinhaltet einen herkömmlichen Schmelztiegel 10 aus Silicium(VI)-oxid zur Aufnahme einer Halbleiterschmelze 12. In der für das vorliegende Beispiel verwendeten Ausführungsform besteht diese Halbleiterschmelze aus reinem Silicium. Den Schmelztiegel umgibt eine Aufnahmeverrichtung 14, um für diesen eine mechanische Halterung bereitzustel-

len. Typischerweise besteht diese Aufnahmeverrichtung 14 aus einem Graphit-Material. Ein Heizelement 16 ist um die Schmelz-
tiegel-Aufnahmeverrichtungs-Kombination herum angeordnet. In einer bevorzugten Ausführungsform beinhaltet dieser Heizer 16 eine Dreiphasen-Wechselstrom-Heizstruktur zum Erwärmen des Schmelztiegels. Diese Widerstandsheizung wird in einfacher Weise durch Anlegen eines dreiphasigen Wechselstromes an 3 übliche Heizspulen bewerkstellt, die in dem Heizer 16 um den Umfang des Schmelztiegels 10 herum angeordnet sind. Die drei einzelnen Abschnitte des Heizers 16, die jeweilige Heizspulen enthalten, sind, wie hier erwähnt sei, in der in Fig. 1A gezeigten Draufsicht zu erkennen. Der Heizer 16 wird so betrieben, daß er die Schmelze 12 auf einer Temperatur gerade über deren Schmelzpunkt hält. In Fig. 1B ist ein Keimkristall 20 zusammen mit einem Teil des gezogenen Kristalls 22, der an der Unterseite des Keimkristalls 20 hängt, gezeigt. Der Keimkristall 20 kann durch eine (nicht gezeigte) übliche Vorrichtung, die zum Fachwissen gehört, in Rotation versetzt werden, um eine zylindrische Konfiguration für den gezüchteten Kristall 22 zu erzielen. Desgleichen kann der Schmelztiegel 10 beispielsweise mittels der Befestigung einer üblichen Antriebsstange 26, die mit dem Mittelpunkt des Bodens der Aufnahmeverrichtung 14 verbunden ist, in Rotation versetzt werden. Die Antriebsstange 26 wiederum kann mit einer (nicht gezeigten) üblichen Rotationsvorrichtung verbunden sein.

Die vorliegende Erfindung liegt in der Rotation der geschmolzenen Material-Schmelze 12 mit einer Rotationsgeschwindigkeit, die als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls 22 zunimmt. Typischerweise wird die Kristalllänge vom eingeschnürten Teil des Kristalls an gemessen. Die Rotation der Schmelze und die Rotationsänderung können durch eine Vielzahl verschiedener Techniken erreicht werden. In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Rotation der Schmelze jedoch in einfacher Weise durch Rotieren des transversalen Magnetfeldes erzielt, das durch die Heizspulen des Heizers 16 in der Schmelze 12 erzeugt wird. Es gehört zum Fachwissen, daß das Halbleitermaterial, wenn es sich in seinem geschmolzenen Zustand befindet,

hoch leitfähig ist. Demgemäß induziert der Wechselstrom, der in den Heizspulen des Heizers 16 fließt, Ströme und magnetische Felder innerhalb der Schmelze 12. Die Rotation der Schmelze wird durch die elektromagnetische Kopplung zwischen den Strömen und den magnetischen Feldern, die in der Schmelze induziert werden, und dem dreiphasigen Wechselstrom, der in dem Dreiphasen-Heizer 16 fließt, erzielt. Diese elektromagnetische Kopplung wird manchmal als hydro-elektromagnetische Kopplung bezeichnet und kann in Analogie zur Funktionsweise eines Wechselstrom-Motors, der aus einem Feld und einem Rotor besteht, gesehen werden.

In Fig. 2 ist ein Schaltkreis zur Erzeugung des Dreiphasen-Wechselstromes gezeigt, der zur Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze 12 verwendet werden kann. Im wesentlichen legt diese Figur Mittel zum Erzeugen eines Dreiphasen-Wechselstromes mit einer Frequenz dar, die als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls variiert werden kann. In der Figur sind drei Wicklungen 50 gezeigt, um die Dreiphasen-Wicklungen des Heizers 16 darzustellen. Zur Steuerung der Zuführung von Gleichstrom von einer Leitung 52 zu den verschiedenen Wicklungen 50 wird ein üblicher, von einem Phasengenerator 54 und einer Inverter-Gate-Ansteuerung 56 gesteuerter Halbleiterschalter 53 verwendet. Dieser Halbleiterschalter 53 und sein zugehöriger Phasengenerator 54 sowie seine zugehörige Inverter-Gate-Ansteuerung 56 sind gängige industrielle Elemente. Beispielsweise kann der Halbleiterschalter 53 durch gesteuerte Gegentakt-Siliciumgleichrichter ausgeführt sein, die so angesteuert werden, daß sowohl die Richtung als auch die Intensität des in die Wicklungen 50 fließenden Stromes und somit die Richtung und Intensität des rotierenden magnetischen Feldes in der Schmelze 12 gesteuert werden. Der Phasengenerator 54 kann in einfacher Weise durch eine übliche Logikplatine zur Bereitstellung von Phasenwinkeln von 120 Grad ausgeführt sein, um drei Phasen mit einer gewünschten Frequenz zu erzeugen. Dieser Phasengenerator 54 legt dann die zur Steuerung der Inverter-Gate-Ansteuerungen 56 erforderlichen Signale an. Es gibt eine Vielzahl von im Handel erhältlichen Geräten, die zur Bereitstellung des Phasengenerators

54 und der Inverter-Gate-Ansteuerung 56 verwendet werden können. Beispielhaft und nicht beschränkend kann die von Polyspede unter der Modellnummer C 200/200/100 hergestellte Geschwindigkeits-Regeleinrichtung mit variabler Frequenz, die für eine Abgabe von 200 kVA und eine maximale Frequenz von 90 Hz dimensioniert ist, verwendet werden. Die Regeleinrichtung beinhaltet Start-, Stopp- und Richtungsumkehr-Drucktasten sowie des weiteren ein 10-Gang-Wählpotentiometer, das auf der Gehäusetür angebracht ist, um die Ausgangsfrequenz zu variieren. Die Frequenz kann alternativ dazu mittels eines Rechnerprogramms variiert werden. Polyspede stellt auch Einheiten mit einer Kapazität von 500 kVA und einer maximalen Ausgangsfrequenz von 600 Hz zur Verfügung.

Eine Auswirkung der Änderung der Frequenz des an die Heizwicklungen 50 angelegten Wechselstromes besteht darin, daß sich die Leistung bei einem konstanten Strompegel mit steigender Frequenz erhöht. Wird jedoch die Leistung an den Heizwicklungen 50 erhöht, wird auch die Wärme vermehrt, die durch diese Wicklungen dem Schmelzriegel 10 zugeführt wird. Diese dem Schmelzriegel zugeführte vermehrte Wärme bewirkt eine Veränderung des Durchmessers des Kristalls 22. Somit sind bestimmte Mittel erforderlich, um die Temperatur der Schmelze 12 ungefähr konstant zu halten. In einer bevorzugten Ausführungsform kann diese Aufrechterhaltung der Temperatur in der Schmelze 12 durch Steuerung der Leistung des Gleichstromes in der Leitung 52 gemäß der Temperatur der Schmelze 12 erreicht werden, um dadurch die Temperatur konstant zu halten. In der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform wird der Gleichstrom auf der Leitung 52 durch Gleichrichten eines Dreiphasen-Wechselstromes, der über die Leitungen 60, 62 und 64 zugeführt wird, mittels eines Gleichrichters 66 erzeugt. Der Gleichrichter 66 kann durch einen üblichen gesteuerten Siliciumgleichrichter-Leistungsregler ausgeführt sein, wobei sechs steuerbare Silicium-Gleichrichterdioden verwendet werden. Eine Gate-Ansteuerung 68 (zum Beispiel ein Magnetverstärker) wird verwendet, um denjenigen Punkt in jedem Zyklus der einzelnen Phasen des Dreiphasen-Wechselstromes zu steuern, an dem die steuerbare Silicium-Gleichrichterdioden in Durchlaßrichtung ge-

schaltet sind. Somit steuert die Gate-Ansteuerung 68 den Betrag der Leistung des an die Leitung 52 angelegten Gleichstromes. Die Gate-Ansteuerung 68 kann entweder manuell gesteuert werden oder über eine Steuerleitung von einem Sensor, der die Temperatur in der Schmelze 12 erfaßt. Ein Filter, das die Kapazitäten 70 und 72 sowie die Induktivität 74 beinhaltet, ist vorgesehen, um jegliche Welligkeit in dem gleichgerichteten Gleichstrom, der an die Leitung 52 angelegt wird, herauszufiltern.

Aus obigem ist ersichtlich, daß die Frequenz des an die Heizwicklungen 50 angelegten Dreiphasen-Wechselstromes unabhängig von der an diese Wicklungen angelegten Leistung ist und getrennt gesteuert wird. Demgemäß kann die Frequenz des an diese Wicklungen angelegten Dreiphasen-Wechselstromes variiert werden, ohne daß dies einen Einfluß auf den Durchmesser des Kristalls 22 hat.

Bei den Experimenten, die zu der vorliegenden Erfindung geführt haben, wurde die Konfiguration von Fig. 1 mit einem an den Dreiphasen-Heizer 16 angelegten Strom von 800 Ampere bei 65 Volt verwendet. Der in den Experimenten benutzte Frequenzwandler, der die Elemente 54, 56 und 68 beinhaltet, bestand aus der oben erwähnten, von Polyspede konstruierten Frequenz-Regeleinrichtung, um eine unabhängige Steuerung von Frequenz und Spannung zu erlauben. Die Ausgangsspannung wurde durch ein externes 0 bis 5 mA Signal von dem zuvor erwähnten Temperatursensor gesteuert. Die Frequenz wurde durch das vorher erwähnte 10-Gang-Wählpotentiometer gesteuert. Diese Frequenz-Regeleinrichtung wies einen begrenzten Frequenzbereich von 40 Hz bis 90 Hz auf. Die in dem Schmelzriegel verwendete Schmelze 12 bestand aus reinem Silicium mit einer Bordotierung. Die verwendete Ziehgeschwindigkeit betrug 7,0 cm/Stunde. Mit dieser Ziehgeschwindigkeit wurden zwei Kristalle aus Silicium mit einer hohen und einer niedrigen Frequenz, d.h. 40 Hz bis 50 Hz bzw. 90 Hz, gezüchtet. Für beide Kristallzüchtungssequenzen wurde der Keimkristall 20 mit -20 min¹ in der zur Rotation der Schmelze 12 entgegengesetzten Richtung in Rotation versetzt, während der Schmelzriegel mit 8 min¹ in der zur Rotation der Schmelze 12 gleichen Richtung in Rotation ver-

setzt wurde. Das Sauerstoffkonzentrationsprofil in axialer Richtung in jedem Kristall wurde mittels der Fouriertransformations-Infrarot(FTIR)-Technik erhalten. Das Sauerstoffkonzentrationsprofil in axialer Richtung (ppma) in Abhängigkeit von der Kristalllänge (cm) ist für den Kristall, der mit einer Heizfrequenz von 40 Hz bis 50 Hz gezüchtet wurde, in Fig. 3 als Kurve 100 gezeigt. In ähnlicher Weise ist das Sauerstoffkonzentrationsprofil in axialer Richtung des Kristalls, der mit einer Heizfrequenz von 90 Hz gezüchtet wurde, in Fig. 3 als Kurve 102 gezeigt. Es ist zu erkennen, daß diese zwei axialen Profile 100 und 102 ziemlich verschieden sind. Der Kristall, der mit einer Leistung von 90 Hz hergestellt wurde, weist im Vergleich zu dem mit der Heizleistung von 40 Hz bis 50 Hz gezüchteten Kristall einen um ungefähr 4 ppma höheres Sauerstoffkonzentrationsniveau auf. Demgemäß zeigen diese axialen Profile eine eindeutige Wirkung der Frequenz der Dreiphasen-Stromversorgung auf das axiale Profil auf. Somit ist klar, daß durch Erhöhen der Frequenz als Funktion der Kristalllänge während des Ziehens des Kristalls das Sauerstoffniveau am hinteren Ende des Kristalls erhöht werden kann. Die durchgezogene Kurve 104 in Fig. 3 zeigt ein axiales Sauerstoffprofil mit einem gewünschten Anstieg der Frequenz. Wie durch Fig. 3 angedeutet, sollten, um den Kristall 22 von seinem Anfangspunkt an der Schulter bis zu einer Länge von ungefähr 7,62 cm zu züchten, die Dreiphasen-Heizwicklungen 50 durch ein dreiphasiges Signal mit 40 Hz angesteuert werden. Um den Kristall von 7,62 cm an auf ungefähr 22,86 cm zu züchten, sollten die Dreiphasen-Heizwicklungen 50 durch ein dreiphasiges Signal mit einer Frequenz angesteuert werden, die über den Bereich von 50 Hz bis 90 Hz variiert. Für Kristallängen größer als 22,86 cm sollten die Dreiphasen-Heizwicklungen 50 durch ein Signal angesteuert werden, das über den Frequenzbereich von 100 Hz bis 200 Hz ansteigt oder variiert.

Fig. 4 zeigt eine graphische Darstellung der Frequenzvariation, die in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zur Züchtung von Siliciumkristallen verwendet werden kann. Es ist zu erkennen, daß die anfängliche Frequenz des dreiphasigen Signals

bei ungefähr 40 Hz konstant ist. In etwa 7,62 cm Entfernung vom Keimkristall beginnt die Frequenz, linear mit der Kristallänge anzusteigen. Diese Frequenzänderung kann in Gleichungsform wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Frequenz (Hz)} = 40 + 4 \times (L - 7,5),$$

wobei L die von der Einschnürung aus gemessene Länge des gezüchteten Kristalls in cm ist.

Entsprechend wurden ein spezielles Verfahren und Mittel zum Steuern der Sauerstoffkonzentration in axialer Richtung in einem Halbleiterkristall durch Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze als Funktion der Länge des Kristalls offenbart. Diese Änderung der Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze beeinflußt das Fließverhalten der Schmelze signifikant, wodurch sowohl die Sauerstoffdurchmischung und der Sauerstoffeinbau in das Kristallgitter als auch der Einbau jeglicher Dotierstoffe und anderer Fremdatome in den gezüchteten Kristall gesteuert werden.

Die oben beschriebene Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze wird in einer bevorzugten Ausführungsform durch Variationen der Frequenz der Dreiphasen-Leistung, die in die Dreiphasen-Wicklungen in dem Heizer eingespeist wird, als Funktion der Länge des Kristalls erzielt. Diese Frequenzänderung der eingespeisten Dreiphasen-Leistung kann über einen weiten Bereich von 0 Hz bis 600 Hz variiert werden. Ein bevorzugter Bereich der Frequenzbereichsvariation erstreckt sich von 30 Hz bis 200 Hz. Diese Frequenzänderung bewirkt effektiv ein gleichmäßiges Sauerstoffkonzentrationsprofil in axialer Richtung in Czochralski-Siliciumkristallen.

Es ist zu erwähnen, daß die an die Heizwicklungen angelegte Leistung während dieser Frequenzvariation unabhängig gesteuert werden sollte, um eine konstante Temperatur in der Schmelze 12 aufrechtzuerhalten.

Es ist außerdem zu erwähnen, daß in der hier offenbarten Ausführungsform der Keimkristall in einer Richtung in Rotation versetzt wurde, die derjenigen der Schmelze 12 entgegengesetzt war, während der Schmelztiegel 10 in der der Drehrichtung der Schmelze 12 entsprechenden Richtung in Rotation versetzt wurde. Die vorliegende Erfindung ist klarerweise nicht auf diese Rotations-Kombination beschränkt, sondern umfaßt eine breite Vielfalt verschiedener Rotationsgeschwindigkeiten und -richtungen der Schmelze, des Schmelztiegels sowie des Keimkristalls.

Zusätzlich ist zu erwähnen, daß, obgleich die vorliegende Erfindung anhand einer Dreiphasen-Stromversorgung und Dreiphasen-Heizwicklungen 50 dargelegt wurde, die vorliegende Erfindung nicht darauf beschränkt ist. Diesbezüglich können die Heizwicklungen 50 eine n-Phasen-Struktur beinhalten und können durch ein n-phäsiges Wechselstromsignal angesteuert werden, wobei n wenigstens gleich 3 ist.

Desgleichen ist zu erwähnen, daß, obgleich die hier offenbarte Ausführungsform der Erfindung den Strom durch die Heizwicklungen 50 verwendete, um die Veränderung der Rotation der Schmelze zu bewirken, die vorliegende Erfindung nicht darauf beschränkt ist. Diesbezüglich kann eine separate Struktur verwendet werden, um eine variable Rotationsgeschwindigkeit für die Schmelze in dem Schmelztiegel zu erzielen.

Zusätzlich ist zu erwähnen, daß die vorliegende Erfindung nicht auf die in Fig. 4 gezeigte Frequenzvariation beschränkt ist, sondern daß selbige eine Vielzahl von Kurvenformen annehmen kann, die nicht linear sind.

Schließlich ist zu erwähnen, daß die vorliegende Erfindung nicht auf das Züchten von Siliciumkristallen beschränkt ist. Diesbezüglich können das vorliegende Verfahren und die vorliegende Vorrichtung dazu verwendet werden, eine gleichmäßige Verteilung verschiedener Dotierstoffe und Fremdatome in axialer Richtung in anderen Halbleiterkristallen, wie GaAs, zu erzielen.

A N S P R Ü C H E

1. Vorrichtung zum Züchten eines Halbleiterkristalls durch das Czochralski-Verfahren, wobei die Vorrichtung einen Schmelztiegel (10) zur Aufnahme einer Schmelze (12), aus welcher der Halbleiterkristall zu züchten ist, Heizmittel (16), um das Material zu schmelzen und das Material in einem geschmolzenen Zustand zu halten, einen Kristallkeimhalter, um einen einkristallinen Kristallkeim (20) zu halten, sowie Mittel, die zum Eintauchen des Kristallkeims in die Schmelze und zum Herausziehen des Kristallkeims aus der Schmelze, um dadurch einen Kristall (22) mit zunehmender Länge daraus zu züchten, betreibbar sind, Rotationsmittel, die so ausgelegt sind, daß sie lediglich die Schmelze mit einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit in Rotation versetzen, wobei sie Mittel zum Erzeugen eines rotierenden transversalen Magnetfeldes in dem geschmolzenen, leitfähigen Material beinhaltet, um dadurch das Material in Rotation zu versetzen, sowie Mittel zur Steuerung der Rotationsmittel beinhaltet, um die Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze zu variieren, wobei die Vorrichtung dadurch gekennzeichnet ist, daß

die Mittel zum Erzeugen des Magnetfeldes Mittel (50, ... Fig. 2) zum Erzeugen eines n-Phasen-Wechselstromes, wobei n wenigstens drei ist, mit einer Frequenz F von etwa 40 Hz von der Einschnürung des Kristallkeims (das Ende des Kristallkeims, das dem Kristallkeimhalter entgegengesetzt ist und ganz am Anfang des Wachstumsprozesses mit der Schmelze in Kontakt steht) bis zur Kristallschulter, die sich etwa 7,5 cm von der Einschnürung entfernt befindet, und dann mit einer Frequenz, die durch $F = 40 + 4(L - 7,5)$ gegeben ist, wobei L ($L > 7,5$) die von der Einschnürung aus gemessene Länge des gezüchteten Kristalls ist, beinhaltet, so daß die Schmelze mit einer Rotationsgeschwindigkeit rotiert wird, die kontinuierlich als lineare Funktion der Länge des ge-

züchteten Kristalls anwächst; und

daß die Heizmittel (16) eine n-phasige, den Schmelztiegel umgebende, magnetische Struktur beinhalten, die so verschaltet ist, daß sie den Strom von den Mitteln zur Erzeugung des n-Phasen-Stromes empfangen, um das transversale Magnetfeld in der Schmelze zu erzeugen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die n-phasige magnetische Struktur eine Struktur zum Erwärmen der Schmelze durch Strahlung/Wärmeleitung beinhaltet; und

wobei die Mittel zum Erzeugen des n-Phasen-Wechselstromes bestehen aus:

einer Gleichstromquelle zur Gleichstromerzeugung;

Mitteln zum Steuern der Leistung des durch die Gleichstromquelle erzeugten Gleichstromes in Abhängigkeit von der Temperatur der Schmelze; und

Mitteln zum Erzeugen des n-Phasen-Wechselstromes aus dem leistungsgesteuerten Gleichstrom.

3. Verfahren zum Züchten von Halbleiterkristallen durch die Czochralski-Technik, wobei ein Halbleiterkeimkristall (20) in einen Schmelztiegel, der ein geschmolzenes, leitfähiges, zum Züchten eines Halbleiterkristalls geeignetes Material (12) enthält, eingetaucht und langsam herausgezogen wird, um einen Halbleiterkristall (22) mit einer mit dem Herausziehen des Keimkristalls immer weiter zunehmenden Länge zu züchten, dadurch gekennzeichnet, daß es die folgenden Schritte beinhaltet:

Anlegen eines rotierenden, transversalen Magnetfeldes an die Schmelze, um deren Rotation zu bewirken, während des Ziehens des Kristalls;

Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit des Magnetfeldes während des Züchtens des Kristalls als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls, um dadurch kontinuierlich die Rotationsgeschwindigkeit der Schmelze zu erhöhen,

wobei der Schritt zum Anlegen des Magnetfeldes die folgenden Schritte beinhaltet:

Erzeugen eines n-Phasen-Wechselstromes mit einer Frequenz, die als Funktion der Länge des aus der Schmelze gezogenen Kristalls variiert, wobei n wenigstens drei ist; und

Anlegen des n-phasigen Stromes an eine den Schmelztiegel umgebende, n-phasige, magnetische Struktur, um das transversale Magnetfeld in der Schmelze zu erzeugen; und

Beenden des Züchtungsvorgangs, wenn die gewünschte endgültige Kristalllänge erreicht ist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Schmelze aus Silicium besteht und der Schritt zur Erzeugung des n-Phasen-Wechselstromes den Schritt der Erzeugung des n-Phasen-Wechselstromes mit einer Frequenz F von etwa 40 Hz von der Einschnürung des Keimkristalls (das Ende des Kristallkeims, das dem Kristallkeimhalter entgegengesetzt ist und ganz am Anfang des Wachstumsprozesses mit der Schmelze in Kontakt steht) bis zu der Schulter, die sich etwa 7,5 cm von der Einschnürung entfernt befindet, und dann mit einer Frequenz beinhaltet, die sich entsprechend der folgenden Gleichung ändert:

$$F = 40 + 4 \times (L - 7,5),$$

wobei L ($L > 7,5$) die von der Einschnürung aus gemessene Länge des Kristalls in cm ist.

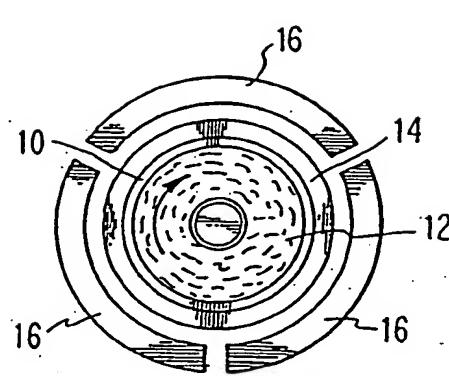


FIG. 1A

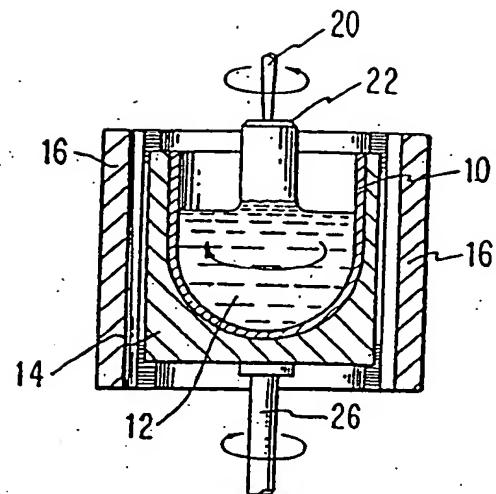


FIG. 1B

MANUELLE
LEISTUNGSEINSTELLUNG LEISTUNGS-
RÜCKKOPPLUNG

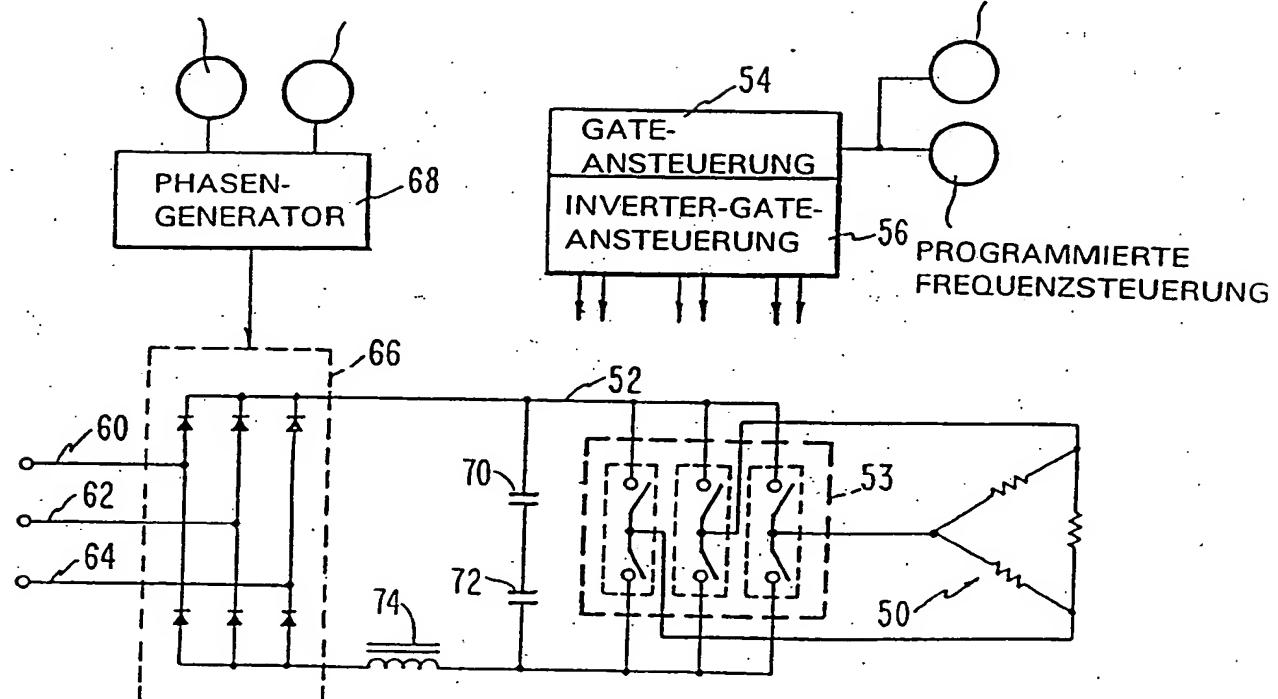
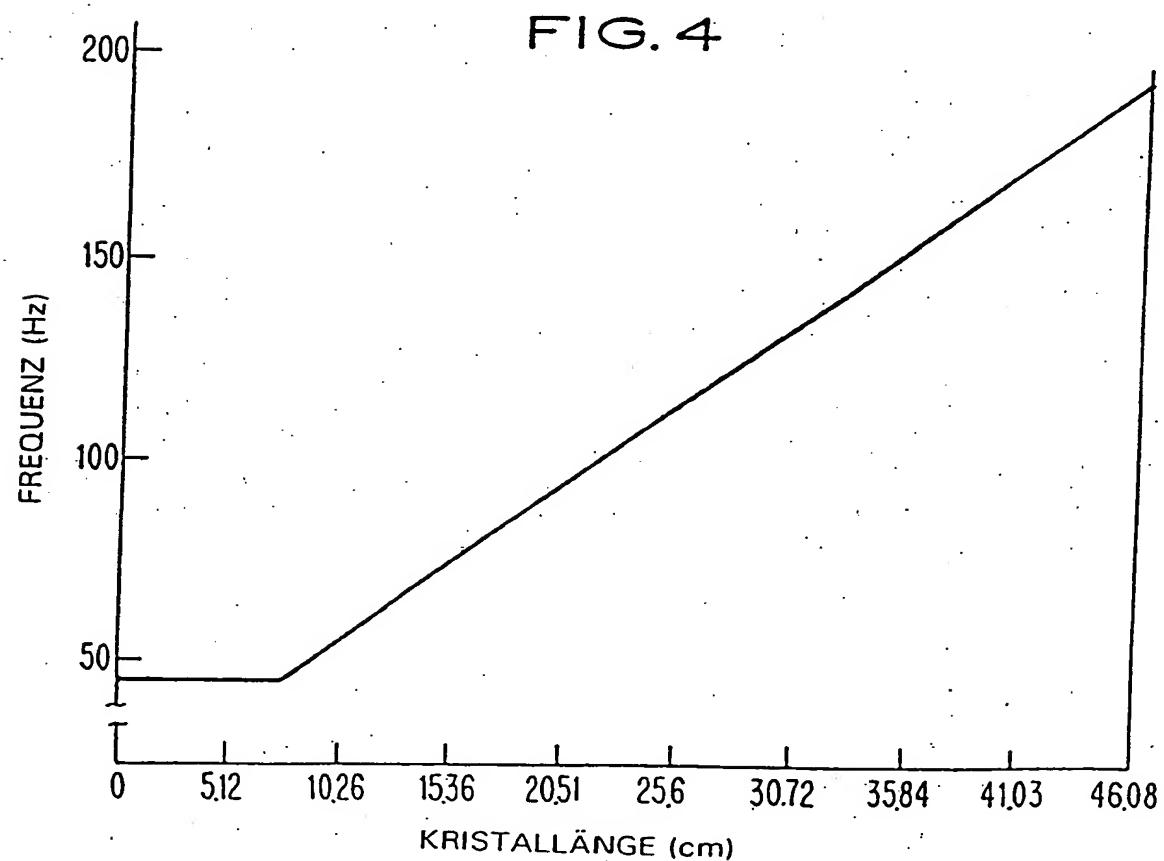
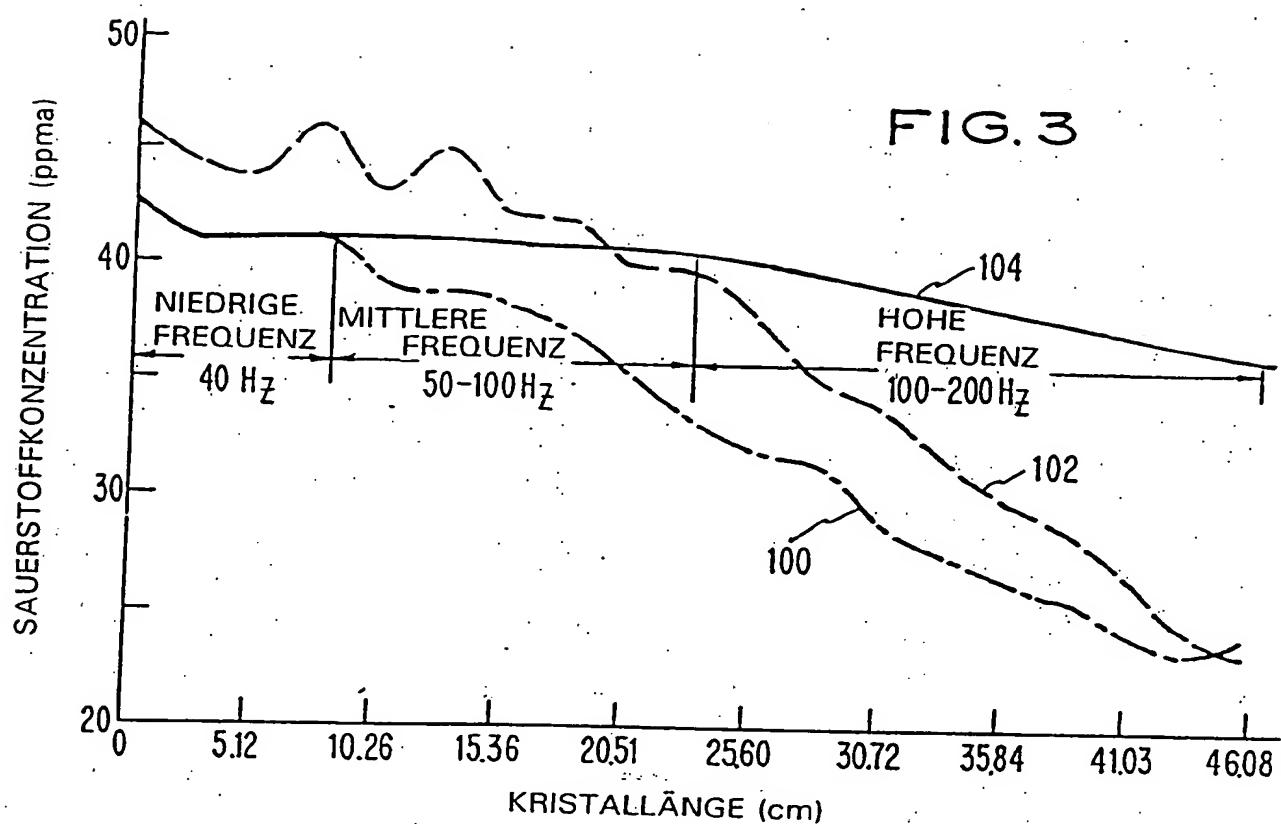


FIG. 2



ENDEBLATT

DRUCKAUFTRAGS-ID: 1683

Benutzer: alfickle
Drucker: gdHO3205
Job Beginn: 10.04.2003 10:17
Job Ende: 10.04.2003 10:17